

## 재결정거동을 고려한 강의 유동응력 예측

이동근\*, 박종진\*\*  
홍익대학교 대학원\*  
홍익대학교 기계공학과\*\*

### Prediction of Flow Stress of Steel in Consideration of Recrystallization

D. G. Lee and J. J. Park  
Hong-ik University, Graduate School\*  
Hong-ik University, Dept. of Mechanical Engineering\*\*

#### Abstract

In the finite element analysis of metal forming problems, the most critical input is the flow stress of workpiece. Conventionally, the flow stress of a metal at elevated temperatures is assumed to be a function of strain, strain rate and temperature, and obtained by experiment. However, if the workpiece is not continuously deformed as in multi-pass rolling, the flow stress obtained by experiment is no longer valid because it does not consider the microstructure evolution occurring between deformations. In the present study, it was attempted that the flow stress of steel in the austenite region be obtained by coupling the Sellars recrystallization modelling equations and the Hernandez flow stress modelling equations. It was applied to the prediction of flow stress variation at each stand during hot finishing rolling of steel.

**Key words** : Flow Stress, Recrystallization, Hot Rolling, Finite Element Method, Retained Strain

#### 1. 서론

최근에 들어와 소성가공시 소재의 변형과 이에 관련된 문제점을 정확히 해석하기 위하여 유한요소해석 기술을 이용하고 있다. 이는 급속한 속도로 발달하고 있는 유한요소해석 기술이 실험에 의한 방법보다 경제적이고 많은 정보를 제공할 수 있기 때문이다. 즉 유한요소해석 기술을 적절히 응용하면 실험에 소요되는 장비, 인력, 시간 등을 크게 절감할 수 있다. 하지만 유한요소해석의 정확성은 사용된 입력자료의 신뢰성에 의존하는데 그중 가장 중요한 입력자료는 소재의 유동응력이다(1).

오스테나이트 강의 유동응력의 모델링은 열간 압연공정에서의 응용가능성으로 인해 많은 관심이 집중되어 왔다. 주어진 온도, 변형률, 변형률속도에서 정확하게 강의 유동응력을 예측할 수 있다면 변형 중 오스테나이트 상에서의 미세조직의 변화와 열간압연에서 각 패스에서의 물 하중을 예측하는데 있어서 큰 도움을 주기 때문이다(2). 이 외에 기존의 연구(3-5)에서는 유동응력을 온도, 변형률, 변형률속도의 함수로 표현하여 유한요소해석을 수행하였으나, 고온변형 특히 고온 단속변형중의 미세조직 변화를 유동응력에 반영시키지 못하므로 해석결과의 신뢰성이 떨어진다. 따라서 온도, 변형률, 변형률속도 외에 미세조직 변화의 영향을 고려하여 유동응력을 구한다면 해석결과의 신뢰성이 높아진다.

본 연구에서는 Sellars의 재결정 모델링 식(4,6)과 Hernandez의 유동응력 모델링 식(7,8)을 조합하여 강의 고온변형 중 발생하는 재결정거동의 영향을 고려한 유동응력을 예측하였고 이를 열간압연공정에 적용하여 보았다.

## 2. 재결정 모델링

열간가공에서 금속재료는 재결정을 발생시키면서 불안정한 에너지상태에서 안정한 에너지상태로 이동한다. 일반적으로 변형이 계속되어 내부에너지가 충분히 높아 재결정이 일어나게 되면 새로운 결정핵은 크랙을 고립시켜 이들의 전파를 더디게 하여 파단에 대한 저항성을 향상시키며, 연성의 증가를 가져와 소성유동을 원활하게 한다. 이러한 재결정거동은 주로 입계에서 일어나며 새로 생성된 핵은 무변형 상태로써 전위밀도가 매우 낮다. 따라서 주위의 결정들에 대하여 전위밀도차가 발생하게 되는데 이것이 구동력이 되어 재결정핵이 성장한다. 이러한 재결정 현상은 고온변형거동에 크게 영향을 미친다. Fig. 1은 고온변형거동을 보여주고 있는데, 이 그림에서 보다시피 고온에서의 유동곡선은 Zener-Hollomon parameter에 크게 의존한다(9).

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right)$$

여기서  $Q_d$ 는 변형 활성화에너지, R은 기체상수, T는 절대온도를 나타낸다. Z가 크면, 즉 온도가 낮거나 가공속도가 큰 경우에는 동적회복이나 동적 재결정에 의한 연화가 가공경화에 의한 경화 보다 적어 변형이 증가함에 따라 응력이 증가한다. 그러나 Z가 적은 경우, 즉 온도가 높거나 변형속도가 느린 경우에는 동적재결정이 변형 중에 일어나 유동곡선이 최대치를 보이고 감소하다가 정상상태에 이를 수 있다. 열간압연의 경우 압연온도가 높은 조압연에서는 가해지는 가공량이 입계변형량인  $\epsilon_c$ 를 넘어 동적재결정이 일어나며, 동적재결정립의 크기는 Z값에 의존한다(10). 그러나 사상압연의 경우에는 동적재결정이 일어나는 일은 드물며 소성가공 후 정적회복과 정적재결정에 의해 어닐링조직으로 돌아간다. 재결정을 결정하는 또 하나의 중요한 인자는 결정립의 크기이다. 결정립 크기가 작을수록 전체 입계면적이 넓어진다. 재결정은 결정립내부보다 상대적으로 불안정한 상태에 있는 입계에서 주로 발생되기 때문에 같은 조건(온도, 변형률, 변형률 속도)에서는 결정립 크기가 작을수록 핵 생성 속도가 빨라진다. 따라서 재결정을 결정하는 주요변수는 초기결정립 크기, 온도, 변형률, 변형률속도라고 할 수 있다(11).

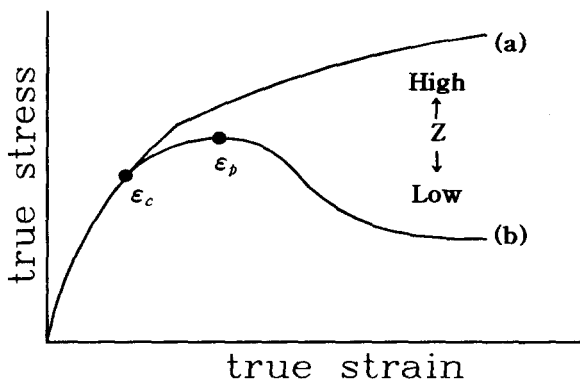


Fig. 1 Typical flow curves :

(a) work hardening, (b) dynamic recrystallization

본 연구에서는 Table 1에 나타난 Sellars식을 사용하여 재결정 예측시스템을 개발하였다. 이 식은 초기 결정립크기와 Z값으로 결정되는 최고변형률  $\epsilon_p$ 의 80%를 기준으로 준동적재결정과 정적재결정으로 구분된다. 이 경우 재결정 완료시간은 각각 변형률속도, 온도 그리고 초기 결정립크기, 온도, 변형률에 의하여 결정된다. 재결정 완료시 결정립크기는 초기 결정립크기와  $\epsilon_p$ 의 곱의 57%를 기준으로 결정되는  $\epsilon^*$ 에 따라 식을 선택하게 되어 있다. 두 식에 의하여 예측되는 결정립크기는 각각 변형률속도, 온도, 그리고 초기결정립도, 변형률에 의하여 결정된다. 재결정분율이 95% 이상 되면 재결정이 완료된 것으로 간주하고 그 후에는 결정립 성장을 계산하였다. 재결정분율이 95% 이하인 경우에는 부분재결정의 경우로써 재결정된 부분과 재결정되지 않은 부분이 공존한다고 가정하였다. 재결정된 부분은 재결정식에 의한 크기를 갖으며 변형률이 없는 반면에, 재결정되지 않은 부분은 초기 결정립크기를 유지하며 변형률을 갖게 된다. 유효 결정립크기는  $\bar{d} = (1-X)d_0 + Xd_{rex}$ 로, 잔류변형률은  $d\epsilon = \epsilon(1-X)$ 로 계산하였다. 이 경우 다음 패스에서 잔류변형률은 누적변형률로, 유효 결정립크기는 초기 결정립크기로 사용하였다. 열간압연에서는 변형에 의한 온도상승, 냉각에 의한 온도강하등으로 온도변화가 발생하게 된다. 본 연구에서는 재결정거동 예측시 이러한 온도변화를 고려하기 위하여 additivity rule(12)을 적용하였다.

**Table 1.** Sellars Recrystallization equations

|                       | Sellars equations   |
|-----------------------|---|
| Related Variables     | $Z = \epsilon \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$ $Q = 312000 (\text{Jmol}^{-1})$ $R = 8.314 (\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1})$ $T = T(\text{K})$ $\epsilon_p = 6.97 \cdot 10^{-4} d_{ini}^{0.3} Z^{0.17}$ $t_{0.5} = 1.06 \cdot 10^{-5} Z^{-0.6} \exp\left(\frac{300000}{RT}\right) \quad (\epsilon \geq 0.8\epsilon_p)$ $X = 1 - \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)\right]$ $t_{0.5} = 2.5 \cdot 10^{-19} d_{ini}^2 \epsilon^{-4} \exp\left(\frac{300000}{RT}\right) \quad (\epsilon \leq 0.8\epsilon_p)$ $X = 1 - \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^2\right]$ |
| Recrystallization     | <p>if <math>X = 0.95</math></p> $d_{rex} = 1.8 \cdot 10^3 Z^{-0.15} (\mu\text{m}), \quad (\epsilon \geq \epsilon^*)$ $d_{rex} = 0.5 d_{ini}^{0.67} \epsilon^{-1} (\mu\text{m}), \quad (\epsilon \leq \epsilon^*)$ $\epsilon^* = 0.57 d_{ini}^{0.17} \epsilon_p$   |
| Grain growth          | $d^{10} = d_{rex}^{10} + 3.87 \cdot 10^{32} t \exp\left(\frac{-400000}{RT}\right), \quad (T \geq 1273(\text{K}))$ $d^{10} = d_{rex}^{10} + 5.02 \cdot 10^{53} t \exp\left(\frac{-914000}{RT}\right), \quad (T \leq 1273(\text{K}))$   |
| Non-recrystallization | $d = d(1-X) + d_{rex}$  |

Z : Zener-Holloman parameter,  $t_{0.5}$  : time for 50% recrystallization

X : recrystallization fraction

### 3. 유동응력 모델링

강이 오스테나이트 상에서 변형을 받게되면 가공경화, 동적회복, 동적재결정의 세가지 지배적인 현상이 발생하게 되며 유동응력 곡선은 이 세가지 현상의 상호작용에 의한 결과로 나타나게 된다(11). 이러한 현상들은 온도, 변형률, 변형률속도등의 공정조건과 재료의 화학조성, 결정립 크기등의 영향을 받는다. 따라서 열간변형중 강의 유동응력을 정확히 예측하기 위해서는 결정립 크기, 화학조성 등의 영향과 변형 중 동적재결정 현상을 고려해 주어야 하며 열간 압연공정의 경우와 같이 고온 단속변형의 경우에는 휴식기에서의 정적재결정, 준동적재결정과 잔류변형률 등도 고려해 주어야한다.

열간공정에서의 유동응력 곡선은 크게 동적재결정이 발생하기전 가공경화와 동적회복만이 일어나는 부분과 동적재결정이 발생한 후의 부분으로 나눌수 있으며 Hernandez식에서는 동적재결정이 발생하기 전의 유동응력인  $\sigma$ 에서 동적재결정 발생 후 연화의 영향인  $\Delta\sigma$ 를 뺀 값으로 유동응력을 계산한다(7,8). 이 식의 정확성을 검증하기 위해 여러 가지 C-Mn강에 대해 기존의 유동응력 실험결과(13)와 비교하여 본 결과, 1000~1200℃의 온도, 1~10/sec의 변형률 속도에서 실험치와 잘 일치하였다. 상대적으로 온도가 낮거나 변형률속도가 빠른 경우는 실험치보다 크게 나타나는 경향을 보였다. 그 중 AISI 1045의 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 이것은 온도는 1100℃, 변형률속도는 1/sec와 2/sec인 경우에 대하여 초기 결정립크기를 10 $\mu$ m와 30 $\mu$ m로 가정하여 유동응력 곡선을 예측한 결과이다.

본 연구에서는 강에 대한 유동응력 곡선을 모델링한 Hernandez식과 앞에서 언급한 재결정 예측시스템을 연계하여 유동응력을 예측하였다. 온도, 변형률, 변형률속도, 초기 결정립크기 등의 조건이 주어지면 변형기에서 동적재결정 예측시스템에 의해 임계변형률과 결정립크기의 변화가 계산되며 Hernandez식에 의해 소재의 유동응력이 계산된다. 변형 후 휴식기에서는 정적, 준동적재결정 예측시스템에 의해 결정립크기의 변화와 잔류변형률이 계산된다. 예측된 결정립크기는 다음 변형기에서의 초기 결정립크기로 주어지고, 잔류변형률은 누적변형률로 축적되게 된다.

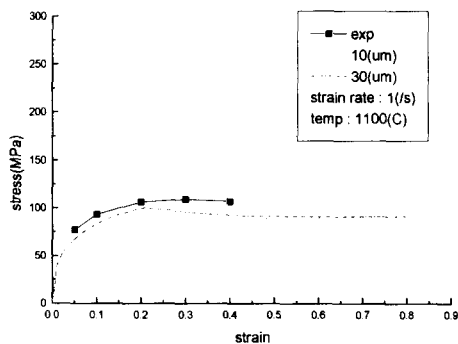


Fig. 2 Predicted flow curves of AISI 1045 (case 1)

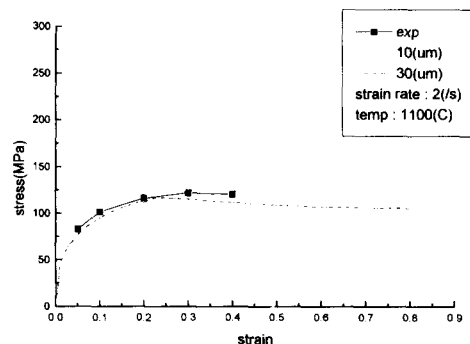


Fig. 3 Predicted flow curves of AISI 1045 (case 2)

#### 4. 열간압연에의 적용

열간압연 공정에서는 온도, 변형률, 변형률속도 외에 초기 결정립크기와 재결정에 따른 결정립 크기의 변화에 대한 고려가 필요하다. 특히 변형기에서의 동적재결정과 휴식기에서의 정적재결정, 준동적재결정과 결정립성장이 충분히 고려되어야 한다. 변형 후 재결정이 완료되지 못한 경우 잔류변형률이 남게된다. 본 연구에서는 앞에서 언급한 재결정 예측 시스템을 이용하여 가상적으로 설정한 열간압연과 실제 사상열간압연에서 발생하는 결정립크기와 잔류변형률의 변화를 예측하고 이를 이용하여 유동응력의 변화를 구하였다.

먼저 모든 패스에서의 온도, 변형률속도, 패스간 시간은 동일하고 한 패스당 변형률이 0.3인 경우와 0.6인 경우에 대해 재결정거동과 유동응력곡선을 예측하였다. 소재는 AISI 1045 (0.45C-0.7Mn-0.5Si)이며 초기 결정립크기는  $100\mu\text{m}$ 로 가정하였다. Figs. 4-6은 한패스당 변형률이 0.3인 경우에 예측된 유동응력, 결정립크기, 잔류변형률의 변화를 나타내었다. 첫 번째 패스에서 임계변형률은 0.51로써 변형률이 임계변형률보다 작으므로 동적재결정이 발생하지 않았고 휴식기에서는 정적재결정이 발생하였으나 발생 즉시 중단되어( $X=0.014$ ) 변형이 거의 모두 잔류변형상태로 남게 된다. 두 번째 패스에서는 잔류변형률 0.296에서부터 변형을 받게되어 임계변형률을 초과하므로 동적재결정이 발생하였으나 완료되지 못하여 준동적재결정이 발생하였다. 재결정 발생으로 인하여 결정립은 미세화되고 따라서 임계변형률도 작아지게 되므로( $\epsilon_c = 0.8Ad_m^m Z^n$ ) 세 번째 패스 후에는 패스변형률이 임계변형률을 넘게되어 동적재결정과 준동적재결정이 발생하였으나 완료되지 않는 못하여 모든 패스에서 잔류변형률이 남게 되었다. 그 결과 유동응력은 변형이 시작될 때 0보다 큰 값에서 출발을 하였다. 최종 결정립크기는  $15.63\mu\text{m}$ 이며 공정 후 잔류변형률은 0.146으로 예측되었다.

Figs. 7-9에는 패스간 변형률이 0.6인 경우 예측된 유동응력, 결정립크기, 잔류변형률의 변화를 나타내었다. 첫 번째 패스에서부터 임계변형률을 넘게 되어 동적재결정이 발생하였고 휴식기에서는 재결정이 완료되지 못하여 잔류변형률이 남았다. 네번째와 다섯번째 패스에서는 유동응력이  $\sigma_p$  값 이후에서 출발을 하고 변형을 받을수록 점차 줄어드는 것을 볼수 있다. 이것은 패스가 진행될수록 결정립 크기가 작아져 임계변형률이 작아졌고 잔류변형률이 누적되어 패스 시작시 실제 적용되는 변형률의 값이 임계 변형률보다 커졌기 때문이다. 최종 결정립크기는  $17.93\mu\text{m}$ 며 잔류변형률은 0.564로 예측되었다.

다음으로 실제 사상열간압연에서 재결정거동과 유동응력을 예측하였다. 소재는 SS400 (0.161C-0.68Mn-0.05Si)이며 사용된 공정조건과 결정립크기의 변화를 Table 2에 나타내었다. 사상압연후 냉각공정까지 결정립변화를 예측하기 위해 7패스후 0.7초까지 예측하였다. 초기 결정립 크기는  $83.93\mu\text{m}$ 이며 변형이 진행됨에 따라 여섯째 패스후  $17.58\mu\text{m}$ 까지 감소하였다가 일곱째 패스후에는  $18.99\mu\text{m}$ 로 약간 증가한다. 세번째 패스까지는 패스변형률이 상대적으로 커서 동적재결정이 발생하였으며 이후 일곱 번째 패스까지는 정적재결정이 발생하였다. 여섯 번째 패스까지는 재결정이 모두 완료되었으나 일곱 번째 패스가 끝난후 재결정이 완료되지 못하고 0.165의 잔류변형률이 남았다. Fig. 10에 예측된 유동응력과 기존의 유동응력식(14)으로 계산한 결과를 비교하였다. 유동응력식은  $\sigma = K [1.3(\epsilon/0.2)^n + 0.3(\epsilon/0.2)] (\epsilon/10)^m$  이다. 여기서  $K = 0.28 \exp[5/t - 0.01/(C+0.05)]$ ,  $n = 0.41 - 0.07C$ ,  $t = T(K)/1000$ ,  $m = (-0.019C - 0.126)t + (0.075C - 0.05)$  그리고 C는 탄소의 wt%이다. 이 경우 기존의 유동응력식에 의한 계산보다 예측된 유동응력이 50~90MPa 정도 높게 나타났는데 상대적으로 온도가 낮고 변형률속도가 높기 때문으로 판단된다. 따라서 Hernandez의 유동응력식이 잘 맞는 온도와 변형률속도 범위를 가지는 압연공정에 적용한다면 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

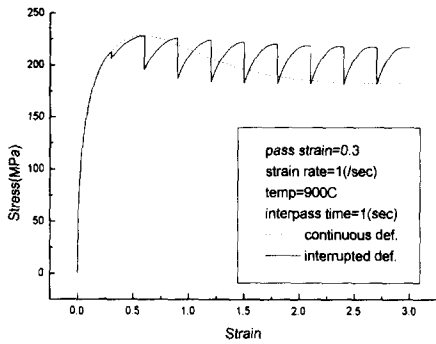


Fig. 4 Predicted flow stress variation during multipass rolling (case1)

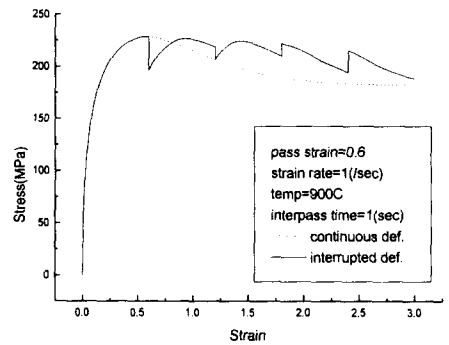


Fig. 7 Predicted flow stress variation during multipass rolling (case2)

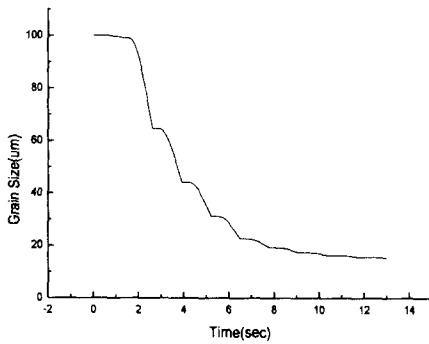


Fig. 5 Predicted grain size (case1)

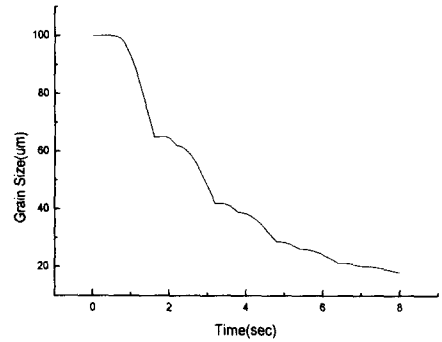


Fig. 8 Predicted grain size (case2)

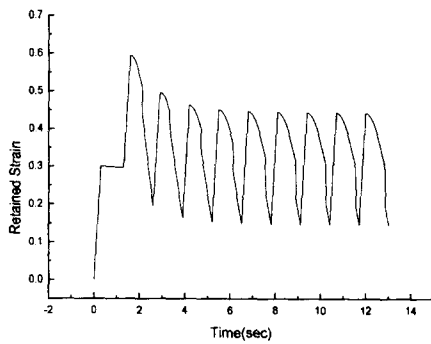


Fig. 6 Predicted retained strain (case1)

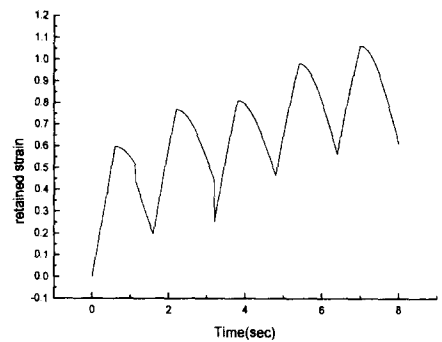


Fig. 9 Predicted retained strain (case2)

Table 2. Rolling conditions and grain size at each stand

| pass no. | $\bar{T}(\text{°C})$ | $\dot{\epsilon}(\text{s}^{-1})$ | $\epsilon$ | $t_i$ | $d(\mu\text{m})$ |
|----------|----------------------|---------------------------------|------------|-------|------------------|
| 1        | 1035                 | 7.748                           | 0.46489    | 5.1   | 52.63            |
| 2        | 1041.8               | 17.34                           | 0.62425    | 3.2   | 51.71            |
| 3        | 1015.4               | 31.458                          | 0.56625    | 2.1   | 48.18            |
| 4        | 973.9                | 48.756                          | 0.4388     | 1.4   | 40.21            |
| 5        | 939.4                | 66.83                           | 0.33415    | 1.1   | 27.48            |
| 6        | 916.7                | 91.243                          | 0.27373    | 0.9   | 17.58            |
| 7        | 897.9                | 88.975                          | 0.17795    | 0.7   | 18.99            |

$t_i$  : interpass time

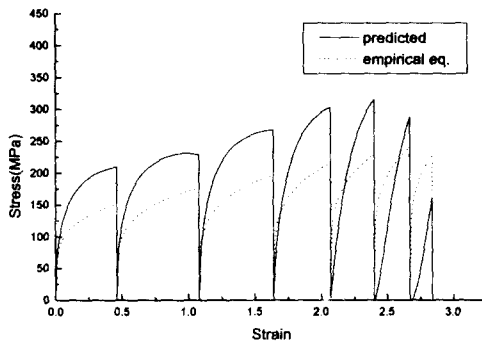


Fig. 10 Flow curves predicted by this study and calculated by empirical equation.

## 5. 결론

본 연구에서는 강의 고온변형시 재결정발생에 따른 연화현상을 고려하여 이론적으로 유동응력을 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였고 이를 여러개의 스탠드로 구성되어 있는 열간압연공정에 적용하여 유동응력의 변화를 예측하여 보았다. 이를 위하여 Sellars의 재결정 모델링 식과 Hernandez 유동응력 모델링 식을 연계하였다. 가상적인 압연공정과 실제 압연공정에 적용하여 차후 연구를 위한 타당성 및 응용성 검증에 초점을 맞추었다. 그 결과 온도가 높고 변형률속도가 상대적으로 느린 후판압연이나 프레스 열간단조공정에의 적용이 보다 타당하리라고 판단되었다.

## 참고문헌

1. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press(1989)
2. C. M. Sellars, Hot Rolling and Forming Processes, ed. by C. M. Sellars and G. J. Davies, Met. Soc., London(1980).
3. 조현중, 유한요소법을 이용한 열간압연공정의 모델링 및 미세조직 예측, 석사논문, 홍익대학교

대학원(1995)

4. 박우진, 이경중, 권오준, 황상무, "열간단조공정중 강의 재결정거동 유한요소해석", 한국소성가공학회지, 제5권, 제4호, pp.305-319(1996)
5. J. S. Lee and J. J. Park, "Prediction of Recrystallization Behavior in Steel Sheet During Hot Rolling Process", ISIJ, pp.500-505(1998), Japan
6. C. M. Sellars, Mater. Sci. Tech. 6, 1072(1990)
7. C. A. Hernandez, S. F. Medina and J. Ruiz, Modelling Austenite Flow Curves in Low Alloy and Microalloyed Steels, Acta Mater., Vol. 44, No.1, pp.155-163(1996)
8. C. A. Hernandez and S. F. Medina, Mem. Scient. Revue Metall, Vol. 66, p.217(1992)
9. C. Zener and J. H. Hollomon, "Effect of Strain Rate Upon Plastic Flow of Steel", J. App. Phy., pp22-32(1943)
10. O. Kwon and A. J. Deardo, Interactions between Recrystallization and Precipitation in Hot-Deformed Microalloyed Steels, Acta Metallurgica, Vol. 39, pp.529-537
11. 조상현, 오스테나이트계 스테인레스강의 고온변형시 동적 및 정적연화에 관한 논문, 인하대학교 박사학위논문(1998)
12. E. Scheil, Arch. Eisenhüttenw., vol. 12, p.565(1935)
13. K. F. Kennedy and G. D. Lahoti, Battelle Columbus Laboratories, Review of Flow Stress Data - Topical Report No.1, No.9, No.16(1981)
14. Y. Misaka and T. Yoshimoto, Japan Society Tech. Plasticity, Vol. 8, p.414(1967)